光质和光周期对山白兰苗木生长、生理的影响

谢慈江[1]，何福英[2]，刘莉[2]，韦秋梅[1]，杨梅[1*]

（1. 广西大学 林学院，南宁 530004；2. 广西南宁良凤江国家森林公园，南宁 530031）

摘要：为筛选山白兰（*Paramichelia baillonii*）苗木培育过程中适宜的光环境，以一年生山白兰幼苗为试验材料，设置 12 h·d^{-1} 和 16 h·d^{-1} 2 个光周期，配合使用红蓝复合光（8R1B、6R1B）、红蓝紫绿复合光（8R1B1P1G、6R1B1P1G）4 种光质和白光（W）对照，采用双因素随机区组试验设计及隶属函数法，探讨了山白兰苗木生长、光合色素、内源激素含量对不同光质和光周期处理的响应规律。结果表明：（1）光质、光周期及其交互作用对山白兰苗高增长量、叶面积、叶绿素 a、玉米素（ZR）、脱落酸（ABA）含量、内源激素比例（IAA/ABA、（IAA+GA_3+ZR）/ABA）等有显著影响（$P<0.05$）。（2）16 h·d^{-1} 光周期有利于苗高增长量、叶面积、苗木质量指数、生物量、叶绿素 a、生长素（IAA）、ZR 含量、内源激素比例的提高。（3）光周期为 16 h·d^{-1} 时，8R1B 处理下的苗高增长量、叶面积和苗木质量指数最大，分别为 21.84 cm、158.39 cm^2 和 2.43；8R1B 处理下的叶绿素 a/b 比例、ZR 含量高于 6R1B 处理，8R1B1P1G 处理下的叶绿素 a、类胡萝卜素、IAA、赤霉素（GA_3）含量、叶绿素 a/b、内源激素比例较 6R1B1P1G 处理大。综上所述，较高比例红光的红蓝复合光质、适当延长光周期有利于提高山白兰苗木质量，而紫绿光的添加未对其生长有促进效果，16 h·d^{-1}×8R1B 处理是最适宜山白兰苗木生长的光照条件。

关键词：山白兰，LED，光质，光周期，生长，光合色素，内源激素

中图分类号：Q945　　**文献标识码**：A　　文章编号：

Effects of light quality and photoperiod on the growth and physiology of *Paramichelia baillonii* seedlings

XIE Cijiang[1]，HE Fuying[2]，LIU Li[2]，WEI Qiumei[1]，YANG Mei[1*]

（1. *College of Forestry*, *Guangxi University*, Nanning 530004, China；2. *Guangxi Nanning Liangfengjiang National Forest Park*, Nanning 530031, China）

Abstract: In order to explore an efficient artificial light environment for improving the quality of *Paramichelia baillonii* and shortening its cultivation cycle, the annual seedlings of *P. baillonii* were exposed to five composite lights, red+ blue (8R1B, 6R1B), red+blue+purple+green (8R1B1P1G, 6R1B1P1G), and white light (W) with two photoperiods (12 h·d^{-1},16 h·d^{-1}), Two-factor experiment with randomized block design and subordinate function were uesd to explore the response pattern of the growth, photosynthetic pigments and endogenous hormones of *P. baillonii* seedlings to different light qualities and photoperiods. The results were as follows: (1) Light quality, photoperiod, and their interaction had significant effects on height growth, leaf area, chlorophyll a, zeatin (ZR), abscisic acid (ABA) content, endogenous hormone ratio (IAA/ABA, (IAA+GA_3+ZR)/ABA), etc. (P<0.05) (2) 16 h·d^{-1} photoperiod was conducive to the improvement of height growth, leaf area, seedling quality index, biomass, chlorophyll a, auxin (IAA), ZR

基金项目：广西林业科技项目（桂林科研 2022ZC 第 75 号）；中央财政林业科技推广示范项目（[2017]TG15 号）[Supported by Science and Technology Project of Guangxi Forestry Bureau（[2022ZC] 75）；Forestry Science and Technology Promotion Demonstration Project of Central Finance（[2017]TG15）] 。

第一作者：谢慈江(1997 -)，硕士研究生，研究方向为森林培育，（E-mail）785587958@qq.com。

***通信作者：**杨梅，博士，教授，研究方向为森林培育，（E-mail）fjyangmei@126.com。

content, and endogenous hormones ratio. (3) Under 16 h·d^{-1}, height growth, leaf area, and seedling quality index under 8R1B treatment reached the maximum value, which were 21.84 cm, 158.39 cm^2 and 2.43 respectively; Compared with the 6R1B treatment, the 8R1B had higher chlorophyll a/b and ZR content; Compared with the 6R1B1P1G treatment, the 8R1B1P1G had higher chlorophyll a, a/b, carotenoids, IAA, gibberellin (GA_3) and endogenous hormones ratio. In conclusion, Red-blue composite light quality with higher red ratio and proper extension of photoperiod are conducive to improving the quelity of *P. baillonii*, and the addition of purple-green light cannot promote its growth, 16×8R1B is the most suitable light condition for the growth of *P. baillonii* seedlings.

Key words: *Paramichelia baillonii*，LED，light quality，photoperiod，growth，photosynthetic pigments，endogenous hormone

光照作为植物生长最关键的自然环境因子，在整个生命周期中起着重要的作用（李雨霏等，2021）。因其存在独特的光谱吸收特性，植物在不同生长阶段所需要的最适光周期不同（王玉卓等，2019），不同光质对植物的影响也具有差异。研究学者在红蓝光质及其多种复合光质组合处理对植物生长、生理等方面进行了广泛研究，例如红蓝组合光质对朱顶红（郄亚微，2020）和石蒜幼苗（李青竹等，2019）的生长、叶片光合色素合成和生物量积累都起到了积极的促进作用，在红蓝组合光中添加绿光不利于茄子幼苗（杨玉凯等，2018）和人参果组培苗（王玉英等，2020）叶绿素的合成，紫光处理使黄色甜椒幼苗叶片株高、生物量、光合色素较白光大幅下降（白生文等，2017）；但在红蓝组光合中增加 25%的绿光（2R1B1G）显著促进了白及叶片生长和叶绿素含量的提高（王婷婷等，2021），在红蓝光基础上适宜增加紫光提高了水培芹菜的产量和品质（刘玉兵等，2020），补充紫绿光、且光周期为 16 h·d^{-1} 对红心杉组培苗的生长生理特性具有积极的作用（徐圆圆，2017）。可见，在人工光源下，红蓝光是设施栽培中应用最多的复合光质，对植物生长具有促进作用，而其他光质对植物的作用效果则并不一致。目前，关于植物对光源响应的研究较多还是集中在蔬菜、果树以及特色经济林，针对林木尤其是珍贵树种的研究并不多见，不同光质组合对林木生长的影响还需要进一步探讨。

山白兰（*Paramichelia baillonii*）别名合果木、拟含笑、山桂花，属于木兰科中的寡种属（合果木属），珍稀常绿阔叶高大乔木，自然分布于我国云南，近年来引种至广西和福建等地。山白兰树形笔直挺拔，木材耐腐抗蛀、纹理天然美观，是南方优良的用材及景观树种（申礼凤等，2011）。由于山白兰种子发芽率低，自然更新能力差，且生境受到较多的人为干扰及环境变化，其天然种群数量逐渐减少，因此，需要通过提升山白兰的种苗人工繁育技术扩大其种群数量。目前，关于山白兰苗期的研究主要集中在生长特性（刘永刚等，2019）、施肥效应（黄振声，2015）和育苗容器（邱琼等，2018）等方面，山白兰苗期高光强适应能力不足（郭昉晨等，2015），一般晴朗天气下的光强或轻度遮阴（透光率 72.3%）有利于苗期生长（马小英和焦根林，2008；刘金炽等，2020），但不同光质对其生长的影响尚不清楚。光质影响植株的形态建成、光合生理和物质代谢等过程。相比于其他光谱区域，红光和蓝光可被光合色素更有效的吸收，红光促进茎增长、提高叶面积，促进植株地上部分质量增加和碳水化合物的合成；蓝光促进气孔的开放和根系增长，调控叶绿素的合成（严宗山等，2020）；绿光可以诱导植物叶柄伸长的避荫应答（吴艳等，2020）和 PEPC 基因的表达（王婷婷等，2021）；紫光能够可延缓植株衰老，提高氮代谢相关酶活性，促进氮素吸收（刘玉兵等，2020）。为探讨山白兰对光质和光周期的响应，本研究以一年生山白兰为研究对象，以发光二极管（light-emitting diode，LED）为人工光源，设置红蓝复合光（8R1B、6R1B）、红蓝紫绿复合光（8R1B1P1G、6R1B1P1G）以及两个光周期（12 h·d^{-1}、16 h·d^{-1}），分析山白兰苗木生长特点、光合色素和内源激素的变化及其相关性，探讨其对不同光质、光周期的响应，为利

用人工光源进一步优化容器育苗、组培快繁技术提供依据，对于开展山白兰光环境适应性、更新机制的研究具有重要的参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为广西良凤江国家森林公园（108°21′ E、22°40′ N）提供的生长健康、长势均匀的一年生山白兰幼苗[平均株高（20.16 ± 1.86） cm，平均地径（7.05 ± 0.23） mm]，移植于直径 10 cm、高 15 cm 的育苗杯中，每杯中定植 1 株，置于苗圃大棚内培养，苗木培养基质为 70%森林土+20%椰糠+10%珍珠岩。LED 灯管（T5 2835L，深圳伟信力光电有限公司生产）规格为 1 200 mm×24 mm，每根灯管功率为 16 W，光质配比由灯珠数量决定。

1.2 试验设计

试验在广西大学林学院苗圃示范基地（108°22′ E、22°48′ N）进行，试验处理从 2017 年 4 月 10 日开始，至 2017 年 9 月 10 日结束。鉴于 610～720 nm 和 400～510 nm 为植物吸收可见光的主要波段，而较少集中于 510～610 nm（周锦业，2013），光照环境处理设白光（W）为对照，红蓝复合光（8R1B、6R1B）、红蓝紫绿复合光（8R1B1P1G、6R1B1P1G）与 12 h·d^{-1}、16 h·d^{-1} 光周期（光期/暗期分别为 12 h/12 h、16 h/8 h）两两组合，不同光质配比是基于 Xu 等（2020）的研究确定，共 10 个处理，其具体设计见表 1，设置 3 个重复，每个重复 10 株苗木。全钢架结构人工培养棚内设有可调节的人工光源，每个处理设 2 个灯管，灯管垂直高度约为 75 cm~85 cm（可调节，具体高度以光照强度相同时为宜），光照强度为 350±10 μmol·m^{-2}·s^{-1}（利用 MQ-500 手持式光量子测量仪测定计算，Apogee Instruments 公司，美国），设遮光材料于不同处理之间避免光源彼此干扰。光周期采用定时器调控，12 h·d^{-1}、16 h·d^{-1} 光周期光照时间分别为 7:00—19:00、5:00—21:00。育苗期间进行常规的苗期管理，每隔两天通风 1 次（20:00-23:00）。

表 1 不同 LED 光处理设计配比与参数

Table 1 Design and parameters of different LED light treatment

处理 Treatment	光谱能量分布 Light spectral energy distribution	光周期 Photoperiod	峰值波长（λp·nm^{-1}）
12×W	荧光灯 Fluorescent	12 h·d^{-1}	380~750
12×8R1B1P1G	红蓝紫绿 Red/Blue/Purple/Green（8:1:1:1）	12 h·d^{-1}	625/465/415/525
12×6R1B1P1G	红蓝紫绿 Red/Blue/Purple/Green（6:1:1:1）	12 h·d^{-1}	625/465/415/525
12×8R1B	红蓝 Red/Blue（8:1）	12 h·d^{-1}	625/465
12×6R1B	红蓝 Red/Blue（6:1）	12 h·d^{-1}	625/465
16×W	荧光灯 Fluorescent	16 h·d^{-1}	380~750
16×8R1B1P1G	红蓝紫绿 Red/Blue/Purple/Green（8:1:1:1）	16 h·d^{-1}	625/465/415/525
16×6R1B1P1G	红蓝紫绿 Red/Blue/Purple/Green（6:1:1:1）	16 h·d^{-1}	625/465/415/525
16×8R1B	红蓝 Red/Blue（8:1）	16 h·d^{-1}	625/465
16×6R1B	红蓝 Red/Blue（6:1）	16 h·d^{-1}	625/465

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长量、生物量指标测定

植株苗高采用 0.1 cm 精度直尺测定，地径采用 0.02 mm 精度游标卡尺测定。苗高、地径增长量由最终值（同年 9 月 10 日测得）与初始值（同年 4 月 10 日测的）差值得出。叶面积采用 YMJ-B 便携式叶面积仪（河南云飞科技有限公司，中国）选取生长中等水平的完全展开叶测定。同年 9 月选取 3 株平均木进行植株总鲜重测定，杀青烘干至恒重后用电子天平

进行称量，测得根、茎、叶等器官的干重和苗木总干重。苗木质量指数（seedling quality index，SQI）计算公式如下：SQI =苗木总干重/（（苗高最终值/地径最终值）+（茎干重/根干重））。

1.3.2 叶绿素、内源激素测定

每个重复随机选 2 株苗木，从各个部位采集不同成熟程度的叶片，将其混合后用以测定生理指标，叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量参照邱念伟等（2016）的方法，称取 1 g 样品，采用 80%丙酮：乙醇=2:1 的混合液提取叶绿素，放置黑暗中 24 h 后采用分光光度计分别在波长 470、649、665 nm 下测定吸光值，据相关公式计算色素含量。

称取 0.5 g 混合样品，液氮磨粉后，加入 2 mL 含 50 mg 聚乙烯吡咯烷酮（polyvinyl pyrrolidone，PVP）的 80%甲醇提取，弱光冰浴研磨后，转入 10 mL 离心管置 4 ℃下提取 12 h 后离心（8 000 r/min，20 min），C-18 萃取后采用酶联免疫法（enzyme linked immunosorbent assay，ELISA）测定植物生长素（indoleacetic acid，IAA）、赤霉素（gibberellins，GA_3）、玉米素（zeatin riboside，ZR）、脱落酸（abscisic acid，ABA）含量，并计算相关内源激素比值，试剂盒购自南京建成公司。

1.3.3 数据处理

本试验中，光质、光周期不仅单独影响山白兰苗木质量，同时彼此之间存在交互作用，因此采用模糊数学的隶属函数法，综合评价不同光质和光周期处理的培育效果，隶属函数计算公式：隶属值 $U(X_i)=(X_i-X_{imin})/(X_{imax}-X_{imin})$。式中：$X_i$ 为指标测定值；X_{imax} 和 X_{imin} 为所有处理中某项指标的最大值和最小值，若某指标与苗木生长呈负相关性，该指标隶属值通过反隶属函数计算：隶属值 $U(X_i)=1-(X_i-X_{imin})/(X_{imax}-X_{imin})$。计算各个处理下不同指标的隶属值平均值，平均值越大表明苗木培育效果越好（张乐华等，2014）。

通过 Microsoft Excel 2016 软件对试验所得数据进行整理，利用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行数据统计与分析（双因素方差分析、差异显著性检验以及 Pearson 相关系数计算），使用 Origin 2021 软件进行图表绘制，图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 光质与光周期对山白兰苗木生长指标的影响

光质、光周期及其交互作用对苗高增长量、叶面积和总鲜重影响极显著（$P<0.01$），但光周期及其交互作用未对地径增长量产生明显影响（表 2）。由图 1 可知，同一光质处理下，光周期 16 h·d^{-1} 下山白兰苗木的总干重和苗木质量指数均比光周期 12 h·d^{-1} 大。光周期 16 h·d^{-1} 下，8R1B 处理下的苗高增长量显著高于其他光质处理，叶面积和植株重量与 6R1B 处理在一个较高的水准，显著大于 W 和 6R1B1P1G 处理；8R1B1P1G 处理下的苗高增长量、地径增长量、叶面积、植株重量和苗木质量指数较 6R1B1P1G 处理高。其中，16×8R1B 处理下的苗高增长量、叶面积和苗木质量指数最大，分别为 21.84 cm、158.39 cm^2 和 2.43，总鲜重（59.88 g）和总干重（13.14 g）则在 16×6R1B 处理下达到最大。

表 2 不同光质及光周期下山白兰苗生长指标的双因素方差分析

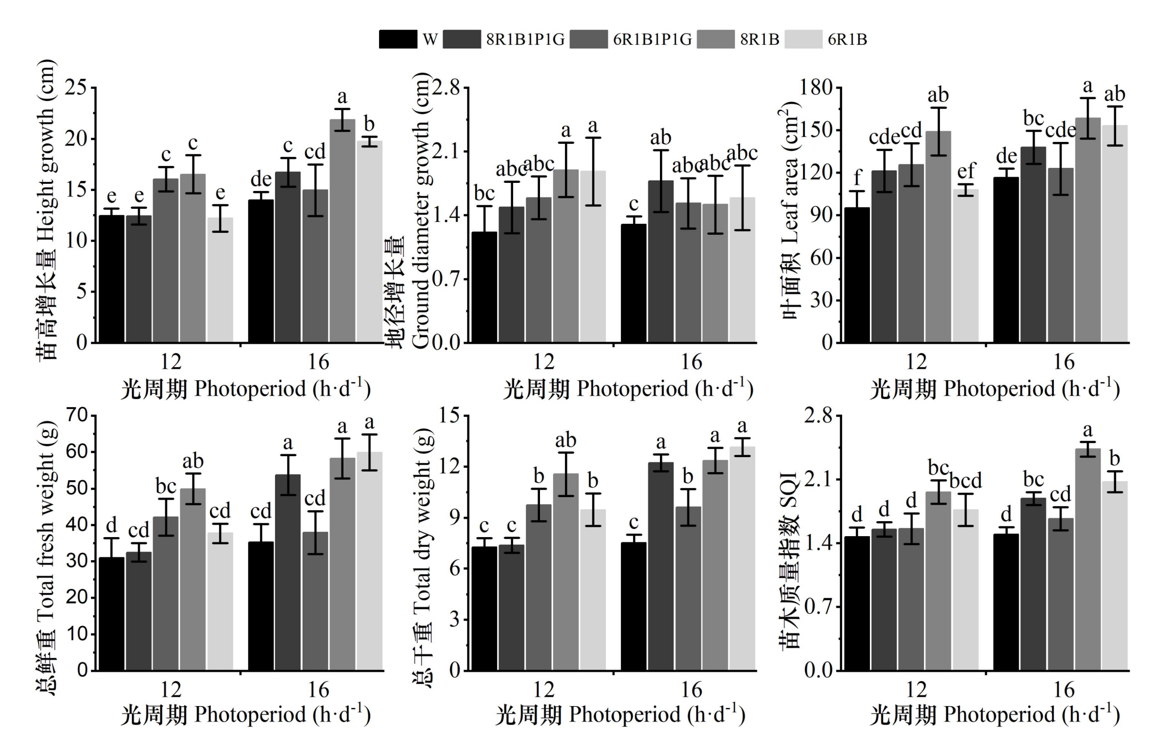
Table 2 Two-way ANOVA analysis on growth indexes of *Paramichelia baillonii* seedling under different light qualities and photoperiods

指标 Index	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality ×Photoperiod	
	F	P	F	P	F	P
苗高增长量 Height Growth	7.105	0.000**	19.956	0.000**	22.800	0.000**
地径增长量 Ground diameter growth	2.728	0.038*	0.75	0.191	1.907	0.072
叶面积 Leaf area	10.930	0.000**	15.962	0.000**	13.990	0.000**
总鲜重 Total fresh weight	4.354	0.008**	11.065	0.000**	10.592	0.000**

总干重 Total dry weight	4.005	0.012*	11.728	0.000**	7.234	0.000**
苗木质量指数 SQI	6.097	0.004**	9.216	0.006**	11.969	0.000**

注：***F***. 检验统计量；***P***. 显著性水平；**SQI**. 苗木质量指数。 * 表示显著差异（*P*<0. 05）；** 表示极显著差异（*P*<0. 01）。下同。

Note：***F***. Tests statistic；***P***. Significance Level；**SQI**. Seedling quality index. * indicates significant differences (*P*<0.05); ** indicates extremely significant differences (*P*<0.01). The same below.



SQI. 苗木质量指数。同图不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著（*P*＜0.05）。下同。

SQI. Seedling quality index. Different lowercase letters indicate significant differences between the two treatments （*P*＜0.05）. The same below.

图 1 不同光质及光周期下山白兰苗生长变化

Fig. 1 The changes of growth of *Paramichelia baillonii* seedling under different light qualities and photoperiods

2.2 光质与光周期对山白兰苗木光合色素含量的影响

光质及其交互作用对山白兰的叶绿素 a、b、a/b 和类胡萝卜素含量影响显著（*P*＜0.05），光周期对叶绿素 a 含量影响极显著（*P*＜0.01）（表 3）。由图 2 可知，同一光质处理下，光周期 16 h·d^{-1} 下山白兰苗木叶绿素 a 含量总体高于光周期 12 h·d^{-1}。光周期 16 h·d^{-1} 下，8R1B、6R1B 为较有利于山白兰合成叶绿素 a 和类胡萝卜素的光质，8R1B 处理下的叶绿素 a/b 显著高于 W、6R1B1P1G 和 8R1B1P1G 处理。8R1B1P1G 处理下的叶绿素 a、类胡萝卜素含量和叶绿素 a/b 较 6R1B1P1G 高。其中，16×8R1B 处理下的叶绿素 a、类胡萝卜素和叶绿素 a/b 最大，分别为 3.88 mg·g^{-1}、0.48 mg·g^{-1} 和 2.32，叶绿素 b 含量（3.23 mg·g^{-1}）则在 16×6R1B1P1G 处理下达到最大。

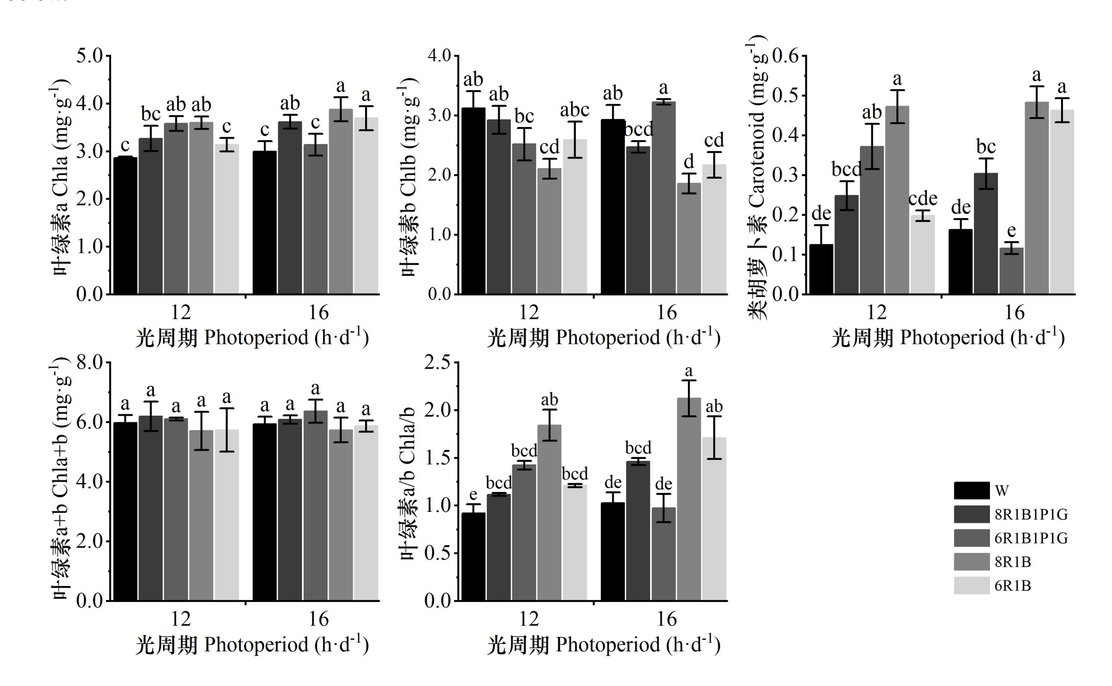
表 3 不同光质及光周期下山白兰苗光合色素含量的双因素方差分析

Table 3　Two-way ANOVA analysis on photosynthetic pigments content of *Paramichelia baillonii* seedling under different light qualities and photoperiods

指标 Index	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality×Photoperiod	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
叶绿素 a Chl a	4.263	0.011*	6.450	0.006**	6.042	0.001**
叶绿素 b Chl b	5.630	0.003**	2.143	0.139	5.054	0.002**
类胡萝卜素 Carotenoid	5.693	0.003**	2.874	0.076	13.168	0.000**
叶绿素 a+b Chl a+b	1.851	0.155	0.106	0.900	0.896	0.540
叶绿素 a/b Chl a/b	4.889	0.006**	2.126	0.141	3.687	0.010*

注：**Chl a**. 叶绿素 a；**Chl b**. 叶绿素 b；**Chl a+b**. 叶绿素 a+b；**Chl a/b**. 叶绿素 a/b。下同。

Note：**Chl a**. Chlorophyll a；**Chl b**. Chlorophyll b；**Chl a+b**. Chlorophyll a+b；**Chl a/b**. Chlorophyll a/b. The same below.



Chl a. 叶绿素 a；**Chl b**. 叶绿素 b；**Chl a+b**. 叶绿素 a+b；**Chl a/b**. 叶绿素 a/b。下同。

Chl a. Chlorophyll a；**Chl b**. Chlorophyll b；**Chl a+b**. Chlorophyll a+b；**Chl a/b**. Chlorophyll a/b. The same below.

图 2　不同光质及光周期下山白兰苗光合色素含量变化

Fig. 2　Changes of photosynthetic pigments content of *Paramichelia baillonii* seedling under different light qualities and photoperiods

2.3 光质与光周期对山白兰苗木内源激素含量的影响

光质、光周期及其交互作用皆对 ZR、ABA 含量以及（IAA+GA_3+ZR）/ ABA 比例影响极显著（P<0.01），光质对 GA_3 含量和 IAA / ABA 比例显著影响（P<0.05），光周期对 IAA 含量和 IAA / ABA 比例影响极显著（P<0.01）（表 4）。由图 3 可知，同一光质处理下，光周期 16 h·d^{-1} 下山白兰苗木具有较高的 IAA、ZR 含量、内源激素比例和较低的 ABA 含量。光周期 16 h·d^{-1} 下，8R1B1P1G 处理下所有内源激素类指标较 6R1B1P1G 均有不同程度的提升，8R1B 处理下 ZR 含量显著高于 6R1B。其中，16×6R1B 处理下的 IAA、IAA / ABA 和（IAA+GA_3+ZR）/ ABA 最大，分别为 67.19ng·g^{-1}、1.43 和 1.75，16×8R1B1P1G 处理下 GA_3 含量最高，为 10.95 ng·g^{-1}，ZR 含量（6.94 ng·g^{-1}）和 ABA 含量（45.07 ng·g^{-1}）在 16×8R1B 下分别达到最大值和最小值。

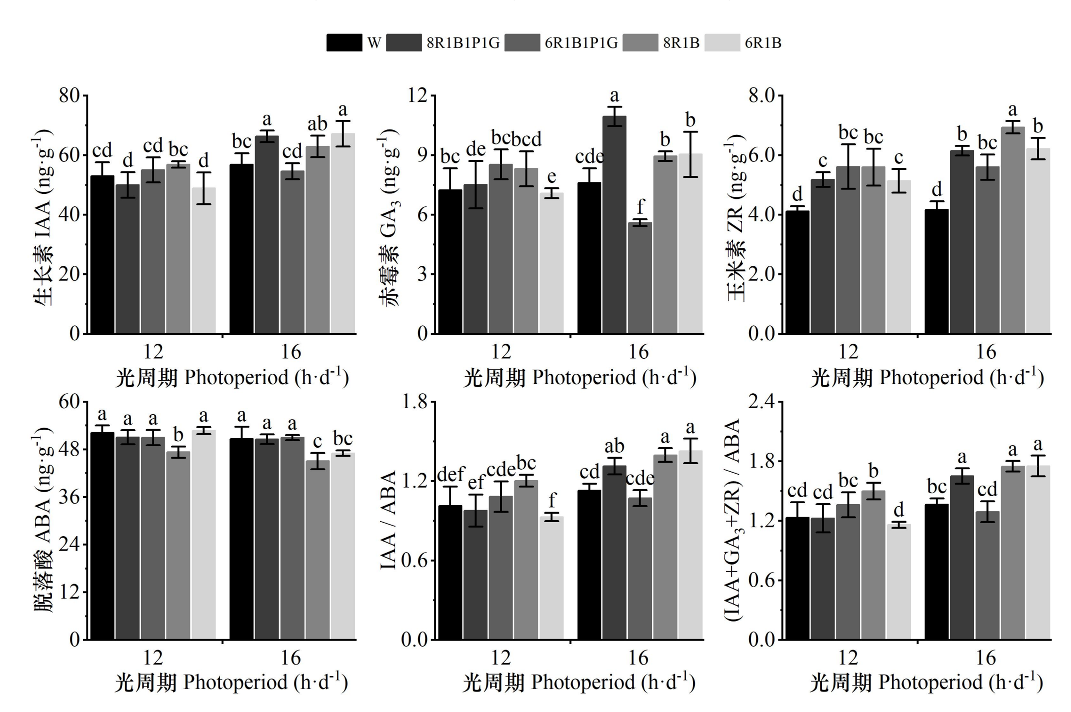
表 4 不同光质及光周期下山白兰苗生物量的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA analysis on endogenous hormone content of *Paramichelia baillonii* seedling under different light qualities and photoperiods

指标 Index	光质 Light quality		光周期 Photoperiod		光质×光周期 Light quality ×Photoperiod	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
生长素 IAA	1.127	0.354	17.547	0.000**	11.417	0.000**
赤霉素 GA_3	4.310	0.005**	2.564	0.087	22.167	0.000**
玉米素 ZR	7.548	0.000**	23.913	0.000**	9.160	0.000**
脱落酸 ABA	12.165	0.000**	6.860	0.002**	17.468	0.000**
IAA / ABA	3.420	0.015*	20.381	0.000**	22.572	0.000**
（IAA+GA_3+ZR）/ ABA	4.374	0.004**	19.652	0.000**	29.443	0.000**

注：**IAA**. 生长素；**GA_3**. 赤霉素；**ZR**. 玉米素；**ABA**. 脱落酸。下同。

Note：**IAA**. Indoleacetic acid；**GA_3**. Gibberellins；**ZR**. Zeatin riboside；**ABA**. Abscisic acid. The same below.



IAA. 生长素；**GA_3**. 赤霉素；**ZR**. 玉米素；**ABA**. 脱落酸。下同。

IAA. Indoleacetic acid；**GA_3**. Gibberellins；**ZR**. Zeatin riboside；**ABA**. Abscisic acid. The same below.

图 3.不同光周期和光质下山白兰苗内源激素含量的变化

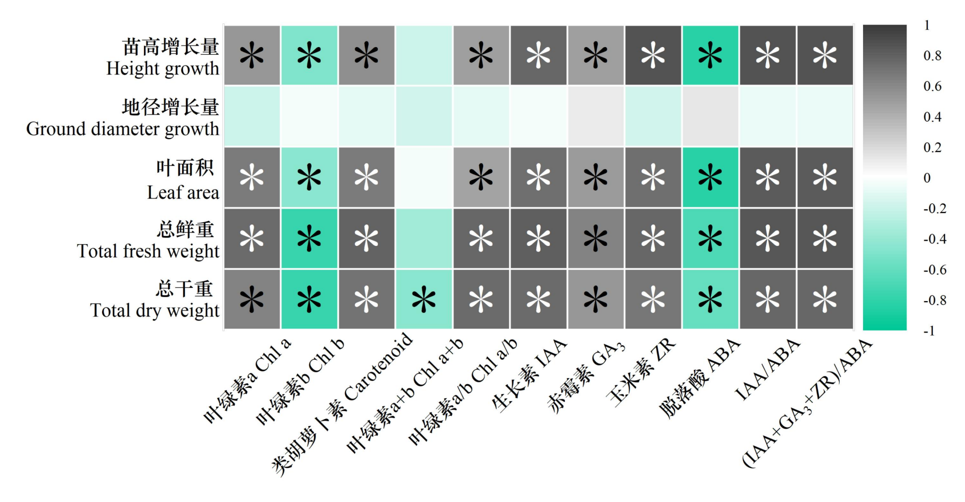
Fig. 3 Changes of endogenous hormone ratio of *Paramichelia baillonii* seedling under different light qualities and photoperiods

2.4 山白兰苗木指标相关性分析及综合评价

使用 Pearson 相关系数，对不同光环境下各生长和生理指标进行关联性特征比较，由图 4 可知，苗高增长量、叶面积和植株重量与叶绿素 a+b 含量以外所有生理指标均显著相关，而地径增长量与光合色素和内源激素的相关性较弱。苗高增长量与 ZR 含量、IAA/ABA、（IAA+GA_3+ZR）/ABA 比例的相关系数较高（r＞0.80），叶面积和植株重量与 IAA/ABA、（IAA+GA_3+ZR）/ABA 也存在较高的相关系数（r＞0.75），同时植株重量与叶绿素 b 含量（$|r|$＞0.75），苗高增长量、叶面积与 ABA 含量（$|r|$＞0.82）之间呈显著负相关。

由于单个指标无法全面地反映苗木的生长状况，因此文中在分析各个指标相关性的基础

上，采用隶属值来反映苗木各部分之间的协调与平衡（张乐华等，2014；姚甲宝等，2019），本研究从 16 个指标中，选出苗高和地径增长量、叶面积、总干重以及光合色素含量和内源激素含量等 11 个指标对不同光环境的培育效果进行综合评价，以选出最有利于促进山白兰苗木生长的光环境。由表 5 可知，隶属值最高的处理是 16×8R1B，说明该光环境下山白兰苗木各生理指标平衡，生长明显优于对照处理，表明高比例红光和较长光周期有利于促进山白兰苗木生长发育，而紫、绿光的添加无显著影响。



注：图中右侧刻度为相关系数（*r*）。

Note：The scale on the right side of the figure is the correlation coefficient（*r*）.

图 4 山白兰苗木生长指标与叶绿素和内源激素含量相关性分析

Fig. 4 The correlation analysis between growth indexes and the contents of chlorophyll and endogenous hormones of *Paramichelia baillonii* seedling

表 5 光质和光周期处理山白兰苗木的指标隶属分析（截取综合排名前 6 的处理）

Table 5 Subordinate analysis of indexes of *Paramichelia baillonii* seedling treated with different light qualities and photoperiods（The treatment of the overall Top 6 treatments is selected）

指标 Index	光质和光周期处理 Light quality and photoperiod treatment					
	16×8R1B	16×6R1B	12×8R1B	16×8R1B1P1G	12×6R1B1P1G	12×6R1B
苗高增长量 Height growth	1.000	0.780	0.446	0.467	0.398	0.000
地径增长量 Ground diameter growth	0.444	0.556	1.000	0.823	0.553	0.973
叶面积 Leaf area	1.000	0.916	0.851	0.676	0.482	0.203
总干重 Total dry weight	0.867	1.000	0.730	0.845	0.422	0.324
叶绿素 a Chl a	1.000	0.817	0.725	0.742	0.709	0.275
叶绿素 b Chl b	1.000	0.771	0.820	0.551	0.517	0.463
类胡萝卜素 Carotenoid	1.000	0.945	0.970	0.510	0.697	0.223
生长素 IAA	0.767	1.000	0.437	0.952	0.337	0.000
赤霉素 GA_3	0.625	0.643	0.507	1.000	0.549	0.277
玉米素 ZR	1.000	0.744	0.526	0.722	0.532	0.363
脱落酸 ABA	1.000	0.743	0.706	0.286	0.230	0.000
隶属值 Membership	0.908	0.827	0.697	0.673	0.451	0.281
综合排名 Rank	1	2	3	4	5	6

3 讨论

3.1 山白兰苗木生长、生物量对光质和光周期的响应

植物主要通过红/远红光受体、蓝光/近紫外光受体、紫外光受体等来感知光信号，对植物的生长发育、生理代谢进行调节（Su et al., 2014; Ouzounis et al., 2015; Manivannan et al., 2015）。光周期为 16 h·d^{-1} 时，8R1B 光质处理下的苗高增长量、叶面积、苗木质量指数显著高于 8R1B1P1G；较 6R1B11P1G 处理，6R1B 处理下苗高增长量、叶面积、植株重量和苗木质量指数更高，可见，红蓝组合光更有利于山白兰苗木的生长，这可能是由于山白兰幼苗对紫光、绿光的需求量小，而红光与叶绿素（640~663 nm）、光敏色素（600~700 nm）的最大吸收波长接近，参与调节植物光合机构运营和同化物运输（Appelgren, 1991; Baroli et al., 2008），蓝光可调控植物气孔开放（Christie, 2007; Gruszecki et al., 2010）。同时，高比例的红光更有利于山白兰苗高的增长和生物量的累积，而随着蓝光比例的增加，其苗高增长量与叶面积减小，这与桑树幼苗（胡举伟等，2018）、红树莓（郭芳等，2016）和香果树（肖志鹏等，2020）对光质的响应相似。而红蓝组合光中紫绿光质的添加对山白兰生长影响不大，这可能与植物对光质的响应具一定的物种特性有关，吴芳兰等（2021）在研究光环境对另一个木兰科树种香梓楠幼苗生长时也发现类似规律。光周期能够诱导、调控并促进营养生长相关基因的表达，前人研究发现延长光周期可提高栎属植物（姚宁等，2022）的相对生长速率，本研究结果表明，光质一定时，延长光周期（16 h·d^{-1}）可提高山白兰的苗高增长量、叶面积及总干重，这是由于植物合成与分配光合作用同化物的时长受光周期的影响（Dong et al., 2016），山白兰进行光合作用的时间随着光周期的延长而增加，表现为足量的有机物得以合成，生长发育和生物量累积加快，但山白兰地径增长对光周期响应并不显著，这说明山白兰光合作用制造的同化物在苗期时很大程度消耗在株高和叶片的生长上。

3.2 山白兰苗木光合色素含量对光质和光周期的响应

光合色素通过吸收、传递光能促进植株生长发育，主要包括叶绿素和类胡萝卜素，其合成受外界光环境影响显著（邢阿宝等，2018），而植物对光能的利用程度可以通过叶绿素 a/b 比例来表现。光周期为 16 h·d^{-1} 时，8R1B 较 8R1B1P1G，6R1B 较 6R1B1P1G 叶绿素 a/b 比值更高，可见山白兰对红蓝光质光能的利用程度更高。同时，高比例的红光有利于山白兰叶绿素 a、类胡萝卜素含量的提升，随着蓝光比例的增大，植株叶绿素 b 含量增加，而枫香幼苗（王冬雪等，2019）表现出与山白兰相反的趋势，这可能是物种差异对不同光谱组合适应性差异的体现。复合光质对植物的作用机理并不是单纯地叠加，12×8R1B1P1G、16×6R1B1P1G 处理下的叶绿素 b 含量显著高于 12×8R1B 和 16×6R1B，表明植物叶绿素受光质加性效应的影响，该效应随着光质种类的丰富更加突出，紫绿光质能够延缓山白兰叶片叶绿素 b 的降解从而增加其含量，转基因 741 杨叶片（张文林等，2016）同样发现加性效应的存在。此外，光质一定时光周期的延长有利于山白兰叶绿素 a 含量的提升，适宜的光周期有利于山白兰提高光合色素含量和光能利用能力。

3.3 山白兰苗木内源激素对光质和光周期的响应

光环境能通过影响植物体内内源激素含量的高低和平衡（韩东花等，2021）来调控植株生长发育（王海波等，2017）。ABA 具有促进植物衰老的作用，而 IAA、GA_3、ZR 能够延衰老（Jibran et al., 2013），IAA/ABA 和（IAA+GA_3+ZR）/ABA 的变化可以作为调控衰老过程的重要生理信号（Ohashi-Kaneko et al., 2007）。光周期为 16 h·d^{-1} 时，8R1B1P1G 处理下山白兰 IAA、GA_3 含量、IAA/ABA 和（IAA+GA_3+ZR）/ABA 比例显著高于 6R1B1P1G，8R1B 处理下 ZR 含量显著高于 6R1B。可见光周期一定时，高红光比例的复合光更有利于山白兰叶片促生类激素的合成，这是由于红光能够利用光敏色素调控促生类激素合成酶的活性，而蓝光对吲哚乙酸（IAA）氧化酶的活性有促进作用，在观光木（刘涛等，2022）和桑树（胡举伟等，2018）对光质的响应中也发现类似规律。光质一定时，光周期 16 h·d^{-1} 下山

白兰 IAA、ZR 含量、IAA/ABA 和（IAA+GA_3+ZR）/ABA 比例较 12 h·d^{-1} 提升明显，光周期的延长有利于山白兰的促生类激素含量的提高，这可能是由于绿色植物的主要光受体 PHYB（樊文娜等，2014）通过光周期来调控内源激素合成和其平衡。

3.4 山白兰苗木对光环境的响应综合评价

植物对外界环境的适应能力无法通过单一指标来体现，研究中常通过苗木的隶属值进行综合评价（汪丛啸等，2022）。本研究中 16×8R1B 处理下山白兰苗木的隶属值（0.908）和苗木质量指数（2.43）最高，该处理下山白兰苗木苗高增长量（21.84 cm）与叶面积（158.39 cm^2）最高，同时有着最高的 ZR（6.94 ng·g^{-1}）和最低的 ABA（45.07 ng·g^{-1}）含量，可见通过选择合适的光周期和光质，可以改善山白兰苗木内源激素水平，促进苗期山白兰的生长发育，提升苗木品质。同时，苗高增长量、叶面积和植株重量与叶绿素 a、类胡萝卜素、IAA、GA_3、ZR 含量、叶绿素 a/b、IAA/ABA 和（IAA+GA_3+ZR）/ABA 比例间均存在显著正相关关系，说明叶绿素、类胡萝卜素和内源激素与山白兰苗木生长关系密切，光周期和光质可以直接影响山白兰苗木的光合色素和内源激素，从而对苗木生长进行调控，但其具体作用机制有待进一步研究。

4 结论

不同光质和光周期通过对山白兰幼苗光合色素和内源激素的影响，调控其苗木生长，苗高增长量、叶面积和植株重量与叶绿素a、类胡萝卜素、IAA、GA_3、ZR含量、叶绿素a/b、IAA/ABA和（IAA+GA_3+ZR）/ABA比例之间均存在显著正相关关系。高红光比例的红蓝复合光源和延长光周期有利于山白兰的生长发育，而红蓝紫绿复合光对促进其生长无显著影响。因此，16 h·d^{-1}×8R1B处理是较为适宜山白兰苗木培育的光环境，该处理下山白兰幼苗光合色素、内源激素的含量均保持在较高水平，有利于改良山白兰幼苗品质。

参考文献：

APPELGREN M, 1991. Effects of light quality on stem elongation of *Pelargonium* in vitro[J]. Sci Hortic, 45(3-4): 345-351.

BAI SW, XU YZ, ZHANG WB, et al., 2017. Effects of blue and purple light on the growth, photosynthetic characteristics and antioxidative activities in yellow sweet pepper seedling[J]. Agric Res Arid Areas, 35(6):146-153. [白生文，许耀照，张文斌，等，2017. 光质对甜椒幼苗生长生理及抗氧化性的影响[J]. 干旱地区农业研究，35(6)：146-153.]

BAROLI I, PRICE GD, BADGER MR, et al., 2008. The contribution of photosynthesis to the red light response of stomatal conductance[J]. Plant Physiol, 146(2): 737-747.

CHRISTIE J, 2007. Phototropin blue-light receptors[J]. Annu Rev Plant Biol, 58: 21-45.

DONG WX, ZHANG YY, ZHANG YL, et al., 2016. Short-day photoperiod effects on plant growth, flower bud differentiation, and yield formation in adzuki bean (*Vigna angularis*) [J]. Int J Agric Biol, 18(2): 337-345.

FAN WN, SUN XG, NI. JX, et al., 2014. Effect of photoperiod on phytochromes and endogenous hormones of alfalfa with different fall-dormancies[J]. Acta Pratac Sin, 23(1): 177-184. [樊文娜，孙晓格，倪俊霞，等，2014. 光周期对不同秋眠型苜蓿光敏色素和内源激素的影响[J]. 草业学报，23(1)：177-184.]

GRUSZECKI W, LUCHOWSKI R, ZUBIK M, et al., 2010. Blue-light-controlled photoprotection in plants at the level of the photosynthetic antenna complex LHCII[J]. J Plant Physiol, 167(1): 69-73.

GUO F, LIU HP, LI BG, et al., 2016. Effect of light quality on growth and partial physiological

and biochemical characteristics of red raspberry tissue culture plantlets[J]. N Hortic, (22): 15-19. [郭芳，刘海鹏，李保国，等，2016. 光质对红树莓组培苗生长及部分生理生化特性的影响[J]. 北方园艺，(22)：15-19.]

GUO FC, LIU SR， WEN YG， et al., 2015. Photosynthetic characteristics of eleven precious broadleaved tree species in south subtropics[J]. Guangxi Sci, 22(6): 606-611. [郭昉晨，刘世荣，温远光，等，2015. 南亚热带11种珍贵阔叶树种光合特性研究[J]. 广西科学，22(6)：606-611.]

HAN DH, YANG GJ, XIAO Y, et al., 2021. Dynamic changes of endogenous hormone content in *Catalpa bungei* seeds during their developmental periods[J]. For Res, 34(1): 56-64. [韩东花，杨桂娟，肖遥，等，2021. 楸树种子发育过程中内源激素含量的动态变化[J]. 林业科学研究，34(1)：56-64.]

HUANG ZS, 2015. Study on the effect of seeding fertilization of *Paramichelia baillonii*[D]. Nanning: Guangxi University. [黄振声，2015. 山白兰苗期施肥效应研究[D]. 南宁：广西大学.]

HU JW, DAI X, SONG T, et al., 2018. Effects of different proportions of red and blue light on the growth and physiological characteristics of mulberry seedlings[J]. Acta Agric Boreal-Sin, 33(S1): 160-169. [胡举伟，代欣，宋涛，等，2018. 不同红蓝光配比对桑树幼苗生长和生理特性的影响[J]. 华北农学报，33(S1)：160-169.]

HU JW, DAI X, SONG T, et al., 2018. Effect of different proportions of red and blue light on carbon-nitrogen metabolism and endogenous hormones in mulberry seedlings[J]. Pratac Sci, 35(10): 2489-2499. [胡举伟，代欣，宋涛，等，2018. 红蓝光配比对桑树幼苗碳、氮代谢和内源激素的影响[J]. 草业科学，35(10)：2489-2499.]

JIBRAN R, HUNTER D, DIJKWEL P, 2013. Hormonal regulation of leaf senescence through integration of developmental and stress signals[J]. Plant Mol Biol, 82(6): 547-561.

LI QZ, CAI YM, YANG Z, et al., 2019. Effects of the quality of LED light on the growth, physiological characteristics, and the accumulation of alkaloids in *Lycoris radiata* [J]. Chin J Appl Environ Biol, 25(6): 1414-1419. [李青竹，蔡友铭，杨贞，等，2019. 不同LED光质对石蒜幼苗生长、生理和生物碱积累的影响[J]. 应用与环境生物学报，25(6)：1414-1419.]

LI YF, GUO PF, ZHANG XY, et al., 2021. Influence of shading on photosynthetic characteristics and growth of *Cyclocarya paliurus* seedlings[J]. J Northeast For Univ, 49(8): 6-10. [李雨霏，郭鹏飞，张小燕，等，2021. 遮荫对青钱柳苗期光合特性和生长的影响[J]. 东北林业大学学报，49(8)：6-10.]

LIU JC, ZHAO LJ, ZHU LQ, 2020. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of three *Magnoliaceae* seedlings[J]. Guihaia，40(8): 1159-1168. [刘金炽，招礼军，朱栗琼，2020. 遮阴对三种木兰科幼苗生长和光合特性的影响[J]. 广西植物，40(8)：1159-1168.]

LIU YG, SU JW, WANG QH, et al., 2019. Growth characteristics of *Paramichelia baillonii* at seedling stage[J]. J West China For Sci, 48(6): 9-14. [刘永刚，苏俊武，王庆华，等，2019. 合果木苗期生长特性[J]. 西部林业科学，48(6)：9-14.]

LIU T, LI WN, WANG JY, et al., 2022. Effects of red and blue light ratio on growth and endogenous hormone synthesis of *Tsoongiodendron odorum* seedlings[J]. J SW For Univ, 42(2): 11-18. [刘涛，李万年，王家妍，等，2022. 红蓝光质配比对观光木苗木生长及内源激素的影响[J]. 西南林业大学学报，42(2)：11-18.]

LIU YB, WANG JW, LUO XH, et al., 2020. Effect of LED light quality on the growth, quality

and key enzyme activi-ties of nitrogen metabolism of celery[J]. Chin Cucurbits Veg, 33(12): 71-76. [刘玉兵，王军伟，罗鑫辉，等，2020. LED 光质对芹菜生长、品质及氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国瓜菜，33(12)：71-76.]

MA XY, JIAO GL, 2008. Photosynthetic characteristics and water use efficiency of *Paramichelia baillonii* of *Magnoliacease*[J]. J Anhui Agric Sci, 36(25): 10787-10789. [马小英，焦根林，2008. 合果木光合生理特性及水分利用特点的研究[J]. 安徽农业科学，36(25)：10787-10789.]

MANIVANNAN A, SOUNDARARAJAN P, HALIMAH N, et al., 2015. Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* cultured in vitro[J]. Hortic Environ Biotechnol, 56(1): 105-113.

OHASHI-KANEKO K, TAKASE M, KON N, et al., 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna[J]. Environ Contr Biol, 45(3): 189-198.

OUZOUNIS T, FRETTÉ X, OTTOSEN C O, et al., 2015. Spectral effects of LEDs on chlorophyll fluorescence and pigmentation in *Phalaenopsis* 'Vivien'and 'Purple Star'[J]. Physiol Plant, 154(2): 314-327.

QIU Q, YANG DJ, ZHONG P, et al., 2018. Effects of seedling substrate, container size and fertilizer amount on the seedling growth of *Paramichelia baillonii*[J]. J W Chin For Sci, 47(6): 131-135. [邱琼，杨德军，钟萍，等，2018. 育苗基质、容器规格和施肥量对山桂花幼苗生长的影响[J]. 西部林业科学，47(6)：131-135.]

QIE YW,2020. Effects of led light quality on growth and physiology characteristics of *Hippeatrum spp*. [J]. N Hortic, (22): 66-71. [郄亚微，2020. 不同LED光质对朱顶红生长和生理特性的影响[J]. 北方园艺，(22)：66-71.]

QIU NW, WANG XS, YANG FB, et al., 2016. Fast extraction and precise determination of Chlorophyll[J]. Chin Bull Bot, 51(5): 667-678. [邱念伟，王修顺，杨发斌，等，2016. 叶绿素的快速提取与精密测定[J]. 植物学报，51(5)：667-678.]

SHEN LF, XIE AD, WANG LH, et al., 2011. Current status of *Paramichelia baillonii* resource utilization and its prospect[J]. J S Agric, 42(11): 1324-1328. [申礼凤，谢安德，王凌晖，等，2011. 山白兰资源研究利用现状及展望[J]. 南方农业学报，42(11)：1324-1328.]

SU N, WU Q, SHEN Z, et al., 2014. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings[J]. Plant Growth Regul, 73(3): 227-235.

WANG CX, HE FY, YANG M, et al., 2022. Effects of three bacillus agents on growth and photosynthetic characteristics of *Parashorea chinensis* Seedlings[J]. J Trop Subtrop Bot, 30(2): 213-223. [汪丛啸，何福英，杨梅，等，2022. 3种芽孢杆菌菌剂对望天树苗木生长和光合特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报，30(2)：213-223.]

WANG DX, SUN HJ, DE YJ, et al., 2019. Change of leaf color of *Liquidambar formosana* seedlings under different light quality treatments[J]. For Res, 32(4): 158-164. [王冬雪，孙海菁，德永军，等，2019. 不同光质处理对枫香幼苗叶色的影响[J]. 林业科学研究，32(4)：158-164.]

WANG HB, WANG S, WANG XD, et al., 2017. Effects of light quality on leaf senescence and endogenous hormones content in grapevine under protected cultivation[J]. Chin J Appl Ecol, 28(11): 3535-3543. [王海波，王帅，王孝娣，等，2017. 光质对设施葡萄叶片衰老与内源激素含量的影响[J]. 应用生态学报，28(11)：3535-3543.]

WANG TT, ZHAN Z, MA J, et al., 2021. Effects of different light qualities on growth and photosynthetic characteristics of *Bletilla striata* seedlings in vitro[J]. Guihaia, 41(4): 584-590. [王婷婷，占卓，马健，等，2021. 不同光质对白及组培苗生长及光合特性的影响[J]. 广西

植物，41(4)：584-590.]

WANG YY, LI R, GAO MB, et al., 2020. Effects of LED light with different light qualities on growth and physiological indexes of *Solanum muricatum* Aiton tissue culture plantlets[J]. Chin J Trop Agric, 40(11): 69-74. [王玉英，李茹，高买波，等，2020. 不同光质LED对人参果组培苗生长和生理指标的影响[J]. 热带农业科学，40(11)：69-74.]

WANG YZ, GU W, CHAO JG, et al., 2019. Effects of different photoperiods on the growth and some physiological and biochemical indexes of *Atractylodes lancea* (Thunb.) DC. during vegetative growth[J]. Guangxi Agric Sci, 50(12): 2673-2679. [王玉卓，谷巍，巢建国，等，2019. 不同光周期对茅苍术营养生长期生长及生理生化指标的影响[J]. 南方农业学报，50(12)： 2673-2679.]

WU FL, LI SL, YANG M, et al., 2021. Effects of LED light qualities and photoperiods on growth and photosynthetic characteristics of *Magnolia hypolampra*[J/OL]. Guihaia, (2022-11-10)1-13. http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20210818.1526.006.html[吴芳兰，李书玲，杨梅，等，2021. LED光质及光周期对香梓楠幼苗生长和光合特性的影响[J/OL]. 广西植物，(2022-11-10)1-13. http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20210818.1526.006.html]

WU Y, RONG R, CHEN F, et al., 2020. Effect of light quality on morphogenesis and photosynthetic characteristics of *Davidia involucrata* seedlings[J]. J Sichuan Agric Univ(Nat Sci Edn), 57(4): 804-810. [吴艳，荣熔，陈放，等，2020. 光质对珙桐幼苗形态建成及光合特性的影响[J]. 四川大学学报（自然科学版），57(4)：804-810.]

XIAO ZP, YIN CM, GUO LJ, et al., 2020. Effect of light quality on seed germination and seeding growth of *Emmenopterys henryi*[J]Bull Bot Res, 40(2): 189-195. [肖志鹏，殷崇敏，郭连金，等，2020. 光质对香果树种子萌发及幼苗生长影响的研究[J]. 植物研究，40(2)：189-195.]

XING AB, CUI HF, YU XP, et al., 2018. Effects of different lights qualities and photoperiods on plant growth and development[J]. North Hortic, (3): 163-172. [邢阿宝，崔海峰，俞晓平，等，2018. 光质及光周期对植物生长发育的影响[J]. 北方园艺，(3)：163-172.]

XU YY, 2017. Effects of composite led on rooting andphysiological and biochemical characteristics of tissue culture seedlings of *Cunninghamia Lanceolata*[D]. Guangxi Univ. [徐圆圆，2017. 复配LED光源对红心杉组培苗生根及生理生化特性的影响[D]. 广西大学.]

XU YY, YANG M, CHENG F, et al., 2020. Effects of LED photoperiods and light qualities on in vitro growth and chlorophyll fluorescence of *Cunninghamia Lanceolata*[J]. BMC Plant Biol, 9;20(1): 269.

YAN ZS, ZHANG XP, WANG L, et al., 2020. Effects of different light intensities and light quality on the growth of the pipeline hydroponic lettuce[J]. N Hortic, (21): 15-20. [严宗山，张想平，王蕾，等，2020. 不同光强和光质对管道水培生菜生长发育的影响[J]. 北方园艺，(21)：15-20.]

YANG YK, CHEN YQ, LIN BY, et al., 2018. Effects of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of eggplant seedling[J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci Ed), 47(6): 673-680. [杨玉凯，艺群，林碧英，等，2018. 光质对茄子幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 福建农林大学学报（自然科学版），47(6)：673-680.]

YAO N, LIU JF, JIANG ZP， et al., 2022. Effects of photoperiod and light quality on seedling growth and chlorophyll fluorescence kinetics of *Quercus* L. [J]. For Res, 35(1): 59-69. [姚宁，刘建锋，江泽平，等，2022. 光周期与光质对栎属幼苗生长及叶绿素荧光的影响[J]. 林业科学研究，35(1)：59-69.]

YAO JB, YUAN XJ, ZHOU XH, et al., 2019. Scheme optimization for big container seedlings of

Taxus wallichiana var. *mairei*[J]. J NE For Univ, 47(11): 11-16. [姚甲宝，袁小军，周新华，等，2019. 南方红豆杉2年生容器苗育苗方案优选[J]. 东北林业大学学报，47(11)：11-16.]

ZHANG LH, WANG SS, SHAN W, et al., 2014. Influences of growth media, and hormone types and concentrations on cutting propagation of *Rhododendron latoucheae*[J]. Sci Silv Sin, 50(3): 45-54. [张乐华，王书胜，单文，等，2014. 基质、激素种类及其浓度对鹿角杜鹃扦插育苗的影响[J]. 林业科学，50(3)：45-54.]

ZHANG WL, REN YC, ZHANG YW, et al., 2016. Effect of different led light qualities on bt toxic protein content and chlorophyll fluorescence of transgenic poplar leaves[J]. Acta Agric Nucl Sin, 30(8): 1639-1645. [张文林，任亚超，张益文，等，2016. 不同光质LED光源对转基因杨树叶片Bt毒蛋白含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 核农学报，30(8)：1639-1645.]

ZHOU JY, DING GC, WANG T, et al., 2013. The status guo of the application of LED light source in seedling breeding and its prospects in the breeding of forestry seedlings[J]. Acta Agric Univ Jiangxi (Nat Sci Ed), 35(2): 370-374. [周锦业，丁国昌，汪婷，等，2013. LED光源在种苗繁育中的应用现状及前景分析[J]. 江西农业大学学报，35(2)：370-374.]